

15. Доброскок В.А., Кузнецов Н.А., Туманов А.И. Математические модели процессов газодинамики и восстановления в доменной печи // Изв. вузов. Черная металлургия. 1985. № 3. С. 145–146.
16. Мойкин В.И., Бабушки Н.М., Боковиков Б.А. Анализ работы доменной печи на комбинированном дутье с применением метода математического моделирования // Сталь. 1984. № 4. С. 9–14.
17. Дмитриев А.Н. Математическое моделирование доменного процесса. – Екатеринбург: УрО РАН, 2011. – 162 с.
18. Информационные системы в металлургии / Н.А. Спирин, Ю.В. Ипатов, В.И. Лобанов [и др.]. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2001. – 617 с.
19. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О.П. Онорин, Н.А. Спирин, В.Л. Терентьев [и др.]. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. – 301 с.
20. Товаровский И.Г. Доменная правка. Монография. – Днепропетровск, ПОРОГИ, 2009. – 768 с.
21. Теория и практика прогнозирования в системах управления / С.В. Емельянов, С.К. Коровин, Л.П. Мышляев [и др.]. – М.: Издат. объединение «Российские университеты», 2008. – 487 с.
22. Загайнов С.А., Онорин О.П., Гилева Л.Ю. Разработка и внедрение математического и программного обеспечения для гибких технологических режимов работы доменных печей // Сталь. 2000. № 9. С. 12–15.
23. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев [и др.]. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 456 с.
24. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев [и др.]. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – 558 с.
25. Оптимизация и идентификация технологических процессов в металлургии / Н.А. Спирин, В.В. Лавров [и др.]. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2006. – 307 с.
26. Использование современных информационных технологий для анализа доменного процесса / Спирин Н.А., Лавров В.В., Рыболовлев В.Ю., Краснобаев А.В., Павлов А.В. // Металлург. 2016. № 5. С. 13–19.

УДК 669.046.564:621.785

М. В. Темлянецв¹, К. С. Коноз¹, О. В. Кузнецова¹, В. Б. Деев², Э. Я. Живаго¹

¹ ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»,
г. Новокузнецк, Россия;

² ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический институт «МИСиС»,
г. Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ОКАЛИНООБРАЗОВАНИЯ СТАЛИ МАРКИ 40С2 ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ НАГРЕВЕ

Аннотация

В статье представлены результаты исследования кинетики высокотемпературного окисления стали марки 40С2. Для осуществления прогнозных расчетов получено уравнение, позволяющее определить угар в зависимости от температуры и времени нагрева. Исследованы особенности строения, химического и фазового состава окалина, образующейся при высокотемпературном нагреве стали марки 40С2.

Ключевые слова: нагрев стали, окисление стали, окалина.

Abstract

The article presents the results of a study of the kinetics of high-temperature oxidation grade steel 40S2. For the implementation of calculations of the derived equation to determine the heat

depending on the temperature and time of heating. Investigated features of the structure, chemical and phase composition of the scale formed at high temperature by heating the steel grade 40S2.

Key words: heating of the steel, oxidation of steel.

Для изготовления пружин, рессор различного назначения и прутковых пружинных клемм – упругих элементов железнодорожных креплений соединения рельсов со шпальной решеткой широко используют средне- и высокоуглеродистые кремнистые стали [1–3]. Технология получения готовых изделий включает прокатку непрерывнолитых заготовок, которые нагревают в методических печах. Взаимодействие окислительной печной атмосферы с поверхностью стали сопровождается окалинообразованием, приводящим к потерям полезной массы металла, формированием на поверхности заготовок окалины, которая может приводить к снижению качества поверхности проката [4, 5]. Существенную роль при этом играют строение и свойства образующейся окалины [5, 6]. При разработке ресурсосберегающих технологий нагрева и назначении температурных режимов, обеспечивающих металлосберегающий нагрев [7–9] необходимы сведения о кинетике окисления стали. Поскольку точные аналитические решения для нахождения зависимости интенсивности окисления сталей различного химического состава отсутствуют, единственным путем получения таких зависимостей является эмпирический. Анализ специальной технической литературы [4, 5, 9–11] показывает, что кинетика окисления кремнистой стали марки 40С2 мало изучена, а количественные данные по влиянию температурно-временного фактора на ее угар отсутствуют. В связи с этим получение новой информации о кинетике высокотемпературного окисления рессорно-пружинной стали марки 40С2 и особенностей строения ее окалины актуально и имеет большое практическое значение.

В данной работе проведено исследование угара стали марки 40С2 (химический состав, %: 0,377 С; 1,604 Si; 0,65 Mn; 0,204 Cr) и особенностей строения, фазового и химического состава ее окалины. Кинетику окисления исследовали с помощью гравиметрического метода на цилиндрических образцах диам. 11 мм, длиной 20 – 30 мм. Образцы вырезали из отрезков круглого проката. Перед вырезкой образцов стержни отжигали и обтачивали на токарном станке с целью полного удаления обезуглероженного слоя.

При проведении лабораторных экспериментов нагрев образцов до температур 850–1200 °С (с шагом 50 °С) и выдержку при постоянной температуре поверхности в течении 5, 15 и 25 мин проводили в электрической печи сопротивления СУОЛ–0,25.1/12,5–И1 с нагревателями из карбида кремния в атмосфере воздуха.

До и после опытов геометрические размеры образцов измеряли штангенциркулем с точностью до 0,1 мм, массу определяли на весах Vibra AF–220CE с точностью до 0,1 мг. Для удаления окалины с поверхности образцы подвергали травлению в подогретом до 40–0 °С 10 %-ном растворе серной кислоты с добавлением 0,1 г/л тиомочевина.

При обработке экспериментальных данных считали, что зависимость угара (или толщины окисленного слоя) от времени подчиняется закону квадратного корня, который отражает диффузионный механизм окалинообразования, температура поверхности металла постоянна во времени и зависимость угара от температурно-временного фактора подчиняется следующему уравнению [4]:

$$U = k\sqrt{\tau}, \quad (1)$$

где k – константа скорости окисления, г/(см² · мин^{0,5}); τ – время выдержки металла при постоянной температуре, мин.

Для соотношения (1) принимают, что константа скорости окисления подчиняется уравнению Аррениуса, которое можно представить в виде [4]

$$k = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad (2)$$

где A – эмпирический коэффициент, зависящий от химического состава стали, состава атмосферы и других факторов, г/(см² · мин^{0,5}); Q – энергия активации или разрыхления

решетки оксида, Дж/кмоль; $R = 8,3143$ – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль К); T – температура, К.

Принимая $B = Q/R$, соотношение (2) записывают в виде

$$k = A \exp\left(-\frac{B}{T}\right), \quad (3)$$

где коэффициент B имеет размерность К.

На рисунке 1 представлена зависимость логарифма константы скорости окисления от температуры для стали марки 40С2.

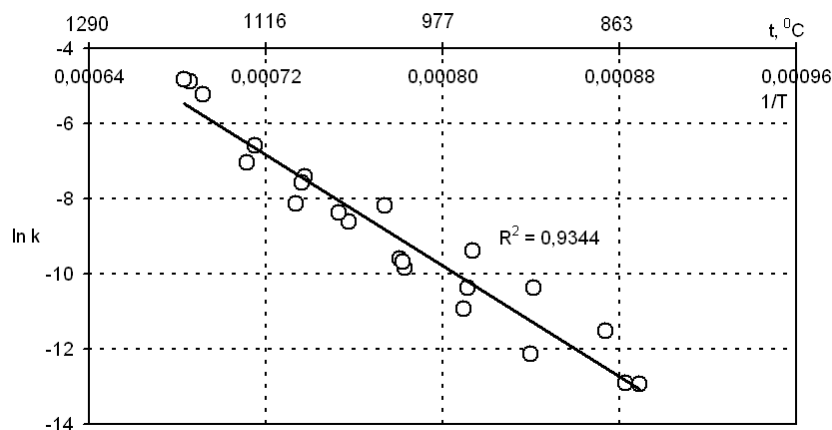


Рис. 1. Зависимость логарифма константы скорости окисления от температуры для стали марки 40С2

Для прогнозных расчетов получена зависимость, позволяющая определить угар U в зависимости от температуры и времени нагрева:

$$U = 22371,9 \cdot \exp(-18435/T) \cdot \sqrt{\tau} \quad (4)$$

Анализ полученных результатов показывает, что температурно-временная зависимость угара стали марки 40С2 аналогична зависимостям, близким по химическому составу сталям марок 60С2 и 60С2ХА [4, 10, 11]. В области температур 1050 – 1100 °С наблюдается резкая интенсификация угара. Для стали марки 40С2 температура оказывает более сильное влияние на угар по сравнению со сталью марки 60С2ХА. В частности при времени выдержки 25 мин повышение температуры с 850 до 1175 °С для стали марки 40С2 сопровождается ростом угара с 0,016 до 0,367 г/см², т.е. почти в 23 раза, а для стали марки 60С2ХА с 0,019 до 0,270 г/см², т.е. в 14 раз. Для стали марки 40С2 в области температур 850 – 950 °С характерно менее интенсивное окалинообразование по сравнению со сталью марки 60С2ХА, а для температур более 1150 °С наоборот.

Исследование структуры, химического и фазового состава окалина проведено в НИТУ «МИСиС» на электронном сканирующем микроскопе TESCAN VEGA 3 с энергодисперсионной приставкой OXFORD AZtec для микрорентгеноспектрального анализа. Образцы для анализа были отобраны от пластинок окалина толщиной 1 – 1,5 мм с образцов, нагретых до 1175 °С, время выдержки составило 25 мин. После нагрева образцы с окалиной охлаждали на атмосферном воздухе в условиях естественной конвекции.

На рисунке 2 представлен общий вид микроструктуры окалина. Слой гематита, граничащий с атмосферой печи имеет минимальную толщину – порядка 40 – 60 мкм, слой магнетита имеет толщину порядка 250 – 280 мкм, наибольшую толщину 800 – 900 мкм имеет слой вюститита с выделившимся при охлаждении вторичным магнетитом, граничащий с поверхностью стали.

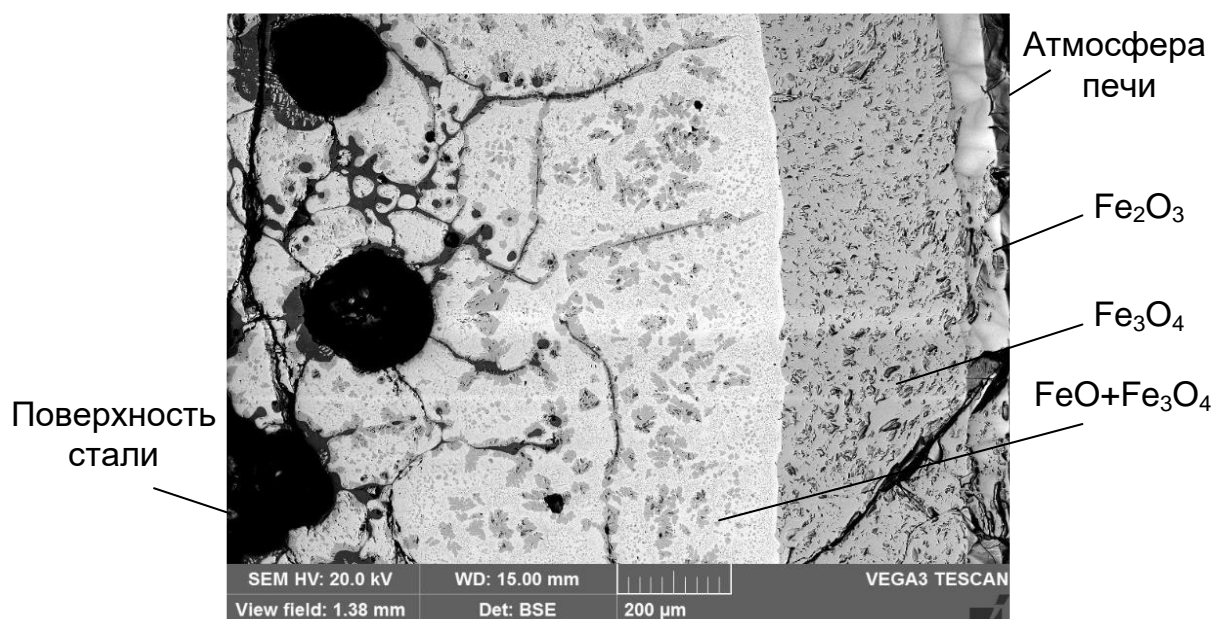


Рис. 2. Микроструктура окалины

Химический и фазовый составы слоев гематита и магнетита относительно равномерны по толщине и периметру (рисунок 3). В таблице 1 представлены их составы в различных точках слоев.

Слой окалины, прилегающий к поверхности стали (рисунок 4) характеризуется гораздо большей макроструктурной, химической и фазовой неоднородностью (таблица 2). Помимо вюститито-магнетитовой смеси присутствуют силикаты железа, характеризующиеся повышенным (до 13 % масс.) содержанием кремния.

По мере приближения к поверхности стали количество участков, обогащенных кремнием увеличивается

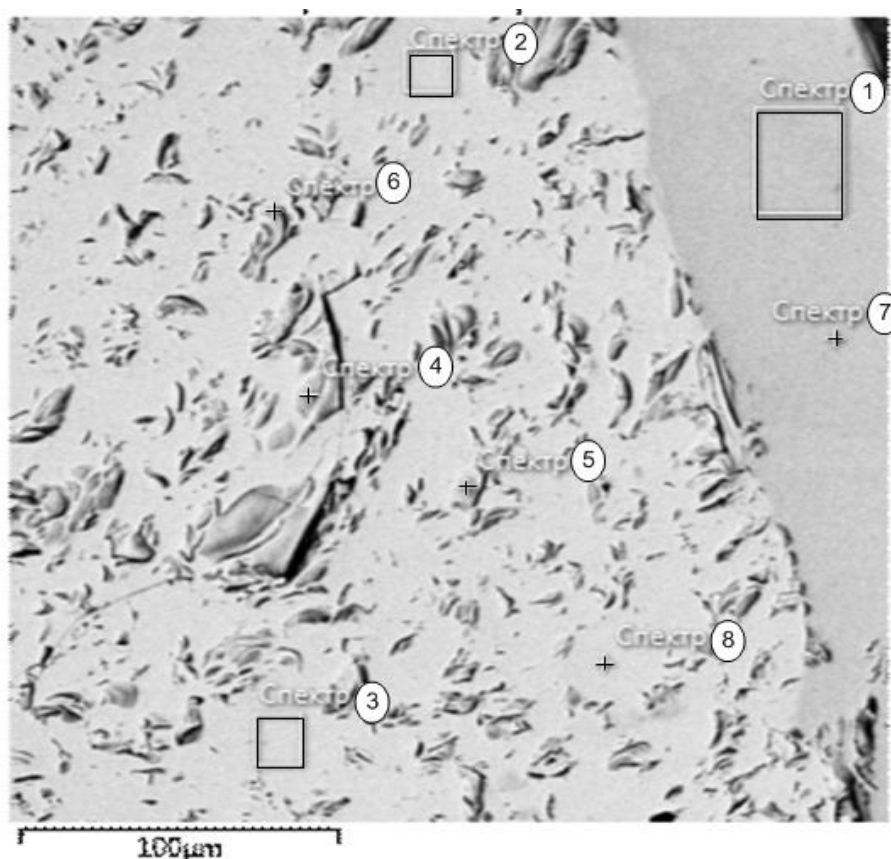


Рис. 3. Микроструктура слоев гематита и магнетита

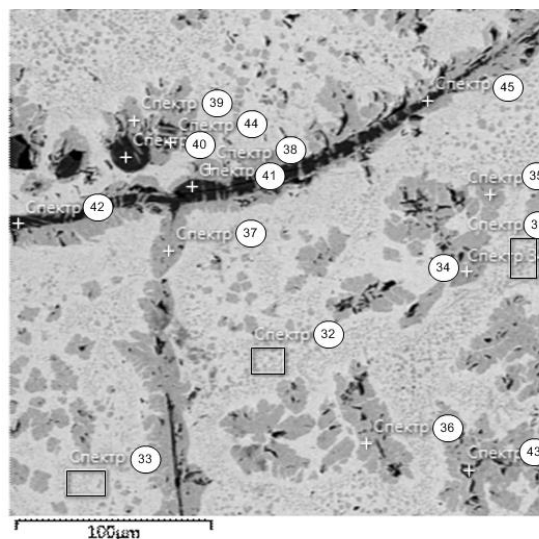


Рис. 4. Микроструктура слоя вюстита с выделившимся при охлаждении вторичным магнетитом

Таблица 1

Химический состав (масс. %) слоев гематита и магнетита

№ спектра	O	Si	P	S	Mn	Fe	Сумма
1 гематит	33,52	0,09	0	0	0,08	66,31	100
7 гематит	34,11	0,06	0,03	0	0,1	65,7	100
2 магнетит	31,37	0	0,02	0,03	0,44	68,14	100
3 магнетит	31,17	0,06	0	0,02	0,52	68,23	100
4 магнетит	31,52	0	0	0,03	0,42	68,02	100
5 магнетит	31,21	0,02	0	0,01	0,45	68,3	100
6 магнетит	31,86	0,02	0	0,01	0,37	67,74	100
8 магнетит	30,19	0,12	0,03	0,03	0,48	69,16	100

Таблица 2

Химический состав (масс. %) слоя вюстита с выделившимся при охлаждении вторичным магнетитом

№ спектра	O	Si	P	S	Mn	Fe	Cu	Mo	Сумма
31 вюстит+магнетит	27,58	0,4	0	0,03	0,55	71,44	—	—	100
32 вюстит+магнетит	27,97	0,06	0,02	0,05	0,42	71,49	—	—	100
33 вюстит+магнетит	27,37	0,04	0,01	0,03	0,43	72,12	—	—	100
34 вюстит+магнетит	31,02	0,02	0	0,05	0,42	68,5	—	—	100
35 вюстит+магнетит	31,77	0,44	0,02	0	0,35	67,43	—	—	100
36 вюстит+магнетит	31,44	0,01	0,01	0,02	0,4	68,12	—	—	100
37 вюстит+магнетит	31,24	0,3	0,02	0	0,31	68,12	—	—	100
38 вюстит+магнетит	31,1	0,33	0	0,04	0,35	68,17	—	—	100
39 вюстит+магнетит	31,67	0,22	0	0	0,36	67,75	—	—	100
40 силикаты железа	36,74	13,58	0,08	0,03	1,61	47,96	—	—	100
41 силикаты железа	36,26	13,48	0,14	0	1,65	48,47	—	—	100
42 силикаты железа	36,04	13,34	0,14	0	1,35	49,14	—	—	100
45 силикаты железа	31,87	7,39	0,01	0,02	1,09	59,62	—	—	100
43 силикаты железа	26,72	2,12	0	0,05	0,3	70,24	0,22	0,35	100
44 силикаты железа	31,77	1,61	0,04	0,04	0,45	66,09	—	—	100

Выводы: Исследовано влияние температурно-временного фактора на кинетику окисления кремнистой рессорно-пружинной стали марки 40С2. Для осуществления прогнозных расчетов получено уравнение, позволяющее определить угар в зависимости от температуры и времени нагрева. Установлено, что в области температур 1050 – 1100 °С наблюдается резкая интенсификация угара, для стали марки 40С2 в области температур 850 – 950 °С характерно менее интенсивное окалинообразование по сравнению со сталью марки 60С2ХА, а для температур более 1150 °С наоборот. С применением электронной сканирующей микроскопии исследовано строение окарины. Установлено, что слой гематита, граничащий с атмосферой печи имеет минимальную толщину – порядка 40 – 60 мкм, слой магнетита имеет толщину порядка 250 – 280 мкм, наибольшую толщину 800 – 900 мкм имеет слой вюститита с выделившимся при охлаждении вторичным магнетитом, граничащий с поверхностью стали. Химический и фазовый составы слоев гематита и магнетита относительно равномерны по толщине и периметру. Слой окарины, прилегающий к поверхности стали характеризуется гораздо большей макроструктурной, химической и фазовой неоднородностью. Помимо вюститито-магнетитовой смеси присутствуют силикаты железа, характеризующиеся повышенным содержанием кремния.

Список использованных источников

1. Рахштадт А.Г. Пружинные стали и сплавы / А.Г. Рахштадт. – М.: Металлургия, 1984. – 359 с.
2. Технология производства прутковых пружинных клемм / С.А. Семихатский, Ю.А. Панфилов, А.И. Кузнецова, Д.А. Шушарин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2006. – № 10. – С. 43–48.
3. Федин В.М. Объемно-поверхностная закалка деталей подвижного состава и верхнего строения пути / В.М. Федин. – М.: Интекст, 2002. – 2008.
4. Темлянцев М.В. Окисление и обезуглероживание стали в процессах нагрева под обработку давлением / М.В. Темлянцев, Ю.Е. Михайленко. – М.: Теплотехник, 2006. – 200 с.
5. Нагрев стальных слябов / В.Н. Перетяtko, Н.В. Темлянцев, М.В. Темлянцев, Ю.Е. Михайленко. – М.: Теплотехник, 2008. – 192 с.
6. Перетяtko В.Н. Исследование влияния строения поверхностных слоев стали на удаление окарины после высокотемпературного нагрева слябов под прокатку / В.Н. Перетяtko, Н.В. Темлянцев // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – Вып. 16. – С. 63–70.
7. Нагрев под прокатку непрерывнолитых заготовок рельсовой электростали / М.В. Темлянцев, В.В. Гаврилов, Л.В. Корнева, А.Ю. Сюсюкин, Н.В. Темлянцев // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2005. – № 6. – С. 69, 70.
8. О выборе температурных режимов нагрева под прокатку непрерывно литых заготовок рельсовой электростали / М.В. Темлянцев, В.В. Гаврилов, Л.В. Корнева, Л.Т. Кожеурова // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2005. – № 12. – С. 47–49.
9. Филиппова М.В. Разработка и внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий обработки металлов давлением / М.В. Филиппова, В.Н. Перетяtko, М.В. Темлянцев. – Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН, 2016. – 269 с.
10. Темлянцев М.В. Высокотемпературное окисление и обезуглероживание кремнистых пружинных сталей / М.В. Темлянцев, Н.В. Темлянцев // Заготовительные производства в машиностроении. – 2005. – №3. – С. 50–52.
11. Высокотемпературное окисление и обезуглероживание рессорно-пружинной стали марки 60С2ХА / М.В. Темлянцев, К.С. Слажнева, А.Ю. Дзюба, А.А. Уманский, Н.В. Темлянцев // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. – Новокузнецк: СибГИУ, 2014. – Вып. 33. – С. 55–63.